

# МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ОБЪЕКТОМ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ И ПРЕДСКАЗЫВАЮЩЕГО ФИЛЬТРА

**Савицкий Сергей Михайлович**

*преподаватель кафедры АУТС Национального технического  
университета «Харьковский политехнический институт»,  
Украина, г. Харьков*

**Гапон Анатолий Иванович**

*канд., техн. наук, проф. Национального технического университета  
«Харьковский политехнический институт»,  
Украина, г. Харьков*

**Евсеев Олег Николаевич**

*студент магистр Национального технического университета  
«Харьковский политехнический институт»,  
Украина, г. Харьков*

Предложен метод управления для тепловых объектов, полученные разгонные кривые теплового объекта, рассчитан максимально допустимый период дискретизации переходного процесса по теореме Котельникова (Найквиста-Шеннона), выбрана частота дискретизации, проведен эксперимент по управлению инерционным тепловым объектом.

**Цель** заключается в предварительном расчёте тепловых коэффициентов [1], предсказании изменения температуры объекта и практическом подтверждении метода управления тепловыми объектами с распределёнными параметрами [2] с помощью ШИМ-регулирования с применением предсказывающего фильтра [3].

Для реализации предложенного метода на стадии подготовки необходимо снять переходные характеристики объекта регулирования и по полученным кривым измерить длительность переходного процесса в объекте —  $t_{\text{пп}}$ .

По определению переходная характеристика — это реакция объекта на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях [4].

В качестве объекта исследований была выбрана стальная труба размерами: длина 355 мм, диаметр 32 мм, с намотанным на одном

конце нагревателем длиной 82 мм от начала трубы. Данные с датчиков снимались с временным периодом, равным 5 секундам.

Для объекта с одним нагревателем и пятью датчиками, равноудалёнными друг от друга на 50 мм, получили переходные характеристики

Для исследования предлагаемого метода управления был выбран первый датчик, расположенный на расстоянии 50 мм от конца нагревателя

На объект наложены ограничения — в диапазоне рабочих температур объект принят линейным, стационарным, с самовыравниванием. Управляющее воздействие формируется в виде импульсов, которые начинаются в моменты времени, кратные выбранному периоду дискретизации, а длительность импульсов определяются по приведенному ниже алгоритму. Внешняя температура в ходе снятия соответствующих характеристик постоянна.

Получение разгонных кривых является решением прямой задачи теплопроводности. Её решение заключается в отыскании температуры тела, удовлетворяющей дифференциальному уравнению теплопроводности (1) и условиям однозначности [5].

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где:  $u(x,y,z,t)$  — функция трёх пространственных переменных  $(x,y,z)$ ;

$t$  — время;

$\alpha$  — положительная константа.

Отыскание граничных условий, в том числе и плотности теплового потока, по имеющейся информации о температуре объекта является предметом решения обратной задачи теплопроводности [6]. Для решения обратной задачи теплопроводности необходимо определить частоту дискретизации, с которой будет восстановлен результат. Для этого изначально необходимо получить график спектров функций переходного процесса.

Используя алгоритмы быстрого преобразования Фурье в пакете программ MatLab, был получен спектр переходной характеристики первого датчика.

Для дискретизации аналогового сигнала без потери информации частота отсчётов должна быть как минимум в два раза выше верхней граничной частоты спектра сигнала  $f_c = 0.0073$  Гц. По теореме Котельникова-Найквиста (2) найдем минимальную частоту и период дискретизации:

$$f_{min} = 0.0073 \cdot 2 = 0.0146 \text{ Гц}$$

$$T = \frac{1}{0.0146} = 68.49 \text{ с}$$

Однако необходимо отметить, что теорема даёт лишь максимальный период, или минимальную частоту дискретизации, что не обеспечивает минимальную методическую ошибку управления. Также необходимо учесть, что чем меньше период дискретизации, тем большее количество коэффициентов для расчетов предсказания. Исходя из этих условий, период дискретизации был выбран равным  $T = 50 \text{ с}$ .

Далее время переходного процесса  $t_{\text{пн}}$  необходимо разделить на  $N$  равных интервалов длительностью  $t_u = T$  в соответствии с выбранным периодом дискретизации и на интервалах  $j \cdot t_u$ , где  $1 \leq j \leq N$ , необходимо снять переходные характеристики объекта под влиянием импульсных сигналов длительностью  $j \cdot t_u$  [7].

В точках  $j \cdot t_u$ , где  $j \cdot t_u = 1 \cdot t_u, 2 \cdot t_u, \dots, N \cdot t_u$  — измеряется значение выходного сигнала (температуры)  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ .

Для линейных объектов справедливо утверждение, что характер переходной функции не зависит от величины (амплитуды) управляющего воздействия, т. е. отношение выходного параметра объекта  $Y(t)$  к управляющему воздействию  $X$  вида единичной функции есть величина постоянная для одного и того же момента времени, для всех  $X$ :

$$K = \frac{Y(t)}{X} \Big|_{t=const} = const \quad (0 < X < X_{\max}), \quad (2)$$

где  $X_{\max}$  — максимальное значение управляющего воздействия, при котором сохраняются линейные свойства объекта управления [7].

$$K_{i,j} = \frac{\Delta \theta_i}{Q \cdot t_{uj}} \Big|_{t_{uj} = t_u \cdot j} \quad (3)$$

рассчитываются соответствующие коэффициенты передачи теплового воздействия  $\eta_{i,j}$  для управления тепловым полем в момент времени  $j$ ,

где:  $\Delta \theta_i$  — приращение температуры на  $i$ -том интервале  $1 \leq i \leq N$ ;

$Q$  — мощность теплового потока;

$t_{uj}$  — длительность импульса;

Любое управляющее воздействие можно представить в виде суммы единичных функций. Для тепловых полей справедлив принцип суперпозиции, который заключается в том, что изменение температуры объекта равно сумме изменений температур, обусловленных каждым тепловым потоком (если их несколько) отдельно.

Для вычисления величины управляющего воздействия, а именно длительности управляющего сигнала, при неизменной амплитуде теплового потока, который за промежуток времени  $t = t_u \cdot j$  выведет объект в точку, заданную программой, необходимо вычислить, в какую точку выйдет объект под действием управляющего воздействия, которое имело место до начала текущего интервала времени  $t_u$ .

Поэтому прогнозируемое изменение температуры объекта в момент времени  $t = t_u \cdot r$  вычисляется без учета теплового потока, который подаётся в момент, когда время превысит  $t = t_u \cdot r$  по формуле:

$$\theta_j = \sum_{i=1}^r \theta_{i,j-i+1} = Q \cdot \sum_{i=1}^r t_{ui} \cdot \eta_{i,j-i+1}, \quad (4)$$

где  $\theta_j$  — расчётная прогнозируемая изменение температуры объекта в  $j$ -той точке в конце  $i$ -того интервала под воздействием теплового потока от нагревателя, подведённого в момент времени  $t = t_u \cdot j$ .

Далее расчётная температура сравнивается с температурой, заданной программно. Разница с соответствующим знаком рассчитывается как:

$$\Delta_1 = \Delta\theta_j^3 - \theta_j^p, \quad (5)$$

где  $\Delta T_r^3$  — приращение температуры, необходимой по программе.

Во время выполнения программы регулирования температура окружающей среды может изменяться. Поскольку скорость изменения температуры окружающей среды намного меньше скорости изменения температуры объекта, переходными процессами, обусловленными колебаниями окружающей температуры, можно пренебречь. Однако эти колебания могут вызвать ошибку рассогласования, которую необходимо учитывать. С этой целью на элемент подаётся код приращения температуры датчика на конец  $j$ -го интервала  $t_u$  и код приращения температуры датчика на этот же момент времени.

Разностный код равняется:

$$\Delta_2 = \Delta\theta_{j-1}^3 - \theta_{j-1}^d, \quad (6)$$

где  $\theta_{j-1}^d$  — вектор приращений температуры в точках.

Суммарный вектор прогнозируемых ошибок рассогласования вычисляется:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta\theta_j^3 - \theta_j^p + \Delta\theta_{j-1}^3 - \theta_{j-1}^d \quad (10)$$

По найденным ранее коэффициентам (3) в процессе работы программы происходит расчёт прогнозируемых значений температуры объекта и по формуле (7) происходит принятие решения о включении нагревателя.

Абсолютная погрешность результата определяется по формуле (7), относительная по формуле (8):

$$\Delta\theta = |\theta_{\text{пр}} - \theta_0| \quad (7)$$

$$\delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta\theta}{\theta_{\text{пр}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

где:  $\theta_{\text{пр}}$  — приближённое значение температуры;

$\theta_0$  — точное значение температуры;

#### **Вывод:**

Предложен метод управления тепловыми объектами с предсказанием с ШИМ — регулированием. Разработан аппаратно-программный комплекс для исследования законов управления тепловыми объектами, включающий в себя закон регулирования, программу управления, нагреватель, датчики температуры, контроллер, объект управления. Предложенный способ относится к системам управления температурой объекта по заданной программе и может быть реализован в энергетике, химической, металлургической, пищевой, жилищно-бытовой и в других областях промышленности. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что данный метод дал приемлемый результат даже для температурно-нестабилизованных условий. Натурный эксперимент показал, что уменьшением периода дискретизации и увеличением интервала предсказаний можно добиться снижения погрешности.

#### **Список литературы:**

1. Бутковский А.Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский. — М.: Наука. Глав. ред. физ-мат. лит., 1975. — 568 с.
2. Воронов А.А. — Теория линейных систем автоматического управления/ под ред. А.А. Воронова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 367 с.

3. Гапон А.И. — Математическая модель предсказывающего фильтра для системы управления тепловыми объектами / Гапон А.И., Рудакова Н.А., Савицкий С.М., Коркин А.М. // Вісник НТУ «ХП» : зб. наук. пр. — Х., 2010. — № 20. — С. 27—33.
4. Гортышов Ю.Ф. — Теория и техника теплофизического эксперимента: [учеб. пособие] / Ю.Ф. Гортышов [и др.]; под ред. В.К. Щукина. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 360 с.
5. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов : учеб. пособие / А.Г. Коротких; Томский политехн. ун-т. — Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. — 97 с.
6. Савицький С.М. — Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції : патент на корисну модель № 81276 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С.М., Гапон А.І., Качанов П.О., Євсеєнко О.М., Вискребенцев В.О. ; заявник Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». — № u201300059; заявл. 02.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. — 4 с.
7. Солодовников В.В. Теория автоматического управления техническими системами: [учеб. пособие] / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. — М.: Изд-во МГТУ, 1993. — 492 с.: ил.